

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Podzemní úložiště nebezpečných odpadů

Underground Repositories of Highly Hazardous waste

Student:

Veronika Petříková

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Karel Vojtasík, CSc.

Ostrava 2012

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě:

.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě:

.....

Podpis studenta

Anotace

Nebezpečné odpady se dnes běžně vyskytují v mnoha formách a jsou zpravidla druhotným odpadovým produktem z řady technologií. Je proto důležité věnovat pozornost jejich zneškodnění, neboť mají velmi nepříznivý vliv na životní prostředí a zdraví lidí. Při zneškodňování nebezpečných odpadů nesmí dojít k žádnému ohrožení životního prostředí a zdraví lidí. Proto se hledají a vyvíjejí nové postupy a technologie, které mají za cíl eliminovat všechna rizika související s nebezpečnými odpady.

Tato práce věnuje pozornost vysoce radioaktivním odpadům z jaderné energetiky a způsobu jejich trvalého bezpečného uložení. Výsledkem práce je seznámení s projektem podzemního úložiště, ve kterém bude ukládán vysoce radioaktivní odpad vyprodukovaný jadernou energetikou v České republice. Bakalářská práce obsahuje 36 stran.

Annotation

Dangerous wastes are now commonly found in many forms and they are usually side product of many industrial technologies. It is therefore important to pay attention to their elimination, as they have a very negative impact on the environment and human health. The disposal of hazardous waste must not cause any threat to the environment and human health. Therefore, the new ways are searched and developed so that to eliminate all risks associated with dangerous waste.

This work pays attention to the highly radioactive waste from nuclear power station and to the matter of its safe storage. Aim of this work is to introduce the project of an underground repository, that will store the highly radioactive waste produced by nuclear power stations of the Czech Republic. Bachelor thesis contains 36 pages.

Klíčová slova

nebezpečný odpad, radioaktivní odpad, hlubinné úložiště radioaktivních odpadů, likvidace radioaktivního odpadu

Keywords

hazardous waste, radioactive waste, underground repository of radioactive waste, disposal of radioactive waste

Obsah

1. Úvod	8
2. Přehled stavu ukládání nebezpečných odpadů v podzemních úložištích v ČR a v zahraničí	10
2.1. Ukládání nebezpečných odpadů v České Republice.....	10
2.2. Ukládání nebezpečných odpadů v zahraničí.....	14
3. Koncepce s nakládáním vyhořelých palivových článků z jaderných elektráren.....	19
3.1. Ukládání do vod moří a oceánů	20
3.2. Ukládání do věčně zmrzlé půdy.....	20
3.3. Hlubinné vrty	20
3.4. Subdukční zóny.....	21
3.5. Mimoszemské ukládání	21
3.6. Chemické přepracování.....	21
3.7. Reaktory IV. Generace	22
3.8. Technologie ADTT (urychlovačem poháněná transmutační technologie)	24
3.9. Věčné uložení do horninového prostředí.....	25
4. Technické řešení úložiště vyhořelých palivových článků z jaderných elektráren	26
5. Řešení geotechnických problémů s ohledem na potřeby úložišť vysoce radioaktivních odpadů.....	30
5.1. Stabilita masivu.....	31
5.2. Hydrogeologie s ohledem na šíření radionuklidů	32
5.3. Výměna tepla mezi skladovaným odpadem a okolní horninou	33
6. Závěr	35
Seznam použitých pramenů	36

1. Úvod

Tato práce je zaměřená na nakládání s nebezpečnými odpady, mezi které se řadí veškeré odpady, které by mohly mít nepříznivý vliv na zdraví člověka i zvířat nebo na životní prostředí. Aby byl odpad označen jako nebezpečný, musí vykazovat minimálně jednu nebezpečnou vlastnost. Mezi tyto vlastnosti patří např. vysoká hořlavost, radioaktivita, výbušnost, žíravost, mutagenita apod. Dále by se zde mohly řadit odpady, které by nebezpečnou vlastnost prokazovaly ve styku s vodou nebo vzduchem [15].

V současné době představují radioaktivní odpady společensky i technicky nejzávažnější problém. Tyto odpady se v prvé řadě rozdělují na dva základní druhy. Jedná se o odpady vznikající v jaderné energetice a odpady institucionální. Jaderný odpad může být ve stavu kapalném, kdy se jedná o kaly či kapaliny, které přišly při provozu jaderné elektrárny do kontaktu s radionuklidy. Mezi kapaliny se pak řadí i voda, která se užívá při přemísťování palivových článků z reaktoru do bazénů, nebo v mokřém způsobu k uskladnění článků viz kapitola 3. Pevné radioaktivní odpady z jaderné energetiky jsou nejrůznější pomůcky a všechny materiály, u kterých nelze vyloučit styk s radionuklidy. Dále se zde jedná hlavně o již zmíněné vyhořelé palivové články. Dalším hlediskem pro rozdělení radioaktivních odpadů je jejich aktivita. Z této skutečnosti vyplývá míra nebezpečí a rozdíl mezi jednotlivými druhy je v celkové době potřebné k uložení, kdy dochází k rozpadu radionuklidů a míra aktivity klesne na úroveň přírodního radioaktivního prostředí. Tím přestane vykazovat nebezpečí kontaminace biosféry. Rozdělení je na odpady nízko a středně aktivní a vysoce aktivní odpady. Maximální doba uskladnění se pohybuje od 300 až 500 let, pokud jde o nízko a středně aktivní odpady a desetitisíce až stovky tisíce let pro odpady vysoce aktivní. Problém pak vzniká v otázce kam s těmito odpady. Haly, které v současné době slouží k uskladnění vysoce aktivních odpadů ve speciálních kontejnerech, nemají neomezenou kapacitu. A stavět další povrchové komplexy je v tomto případě neefektivní a nevhodný z hlediska bezpečnosti a pro životní prostředí [1], [14].

Cílem této práce je představit současný stav ukládání odpadů u nás i v zahraničí a představit vhodnou koncepci pro ukládání především vysoce aktivních odpadů, kde se především řadí vyhořelé palivové články z jaderných elektráren. Dále stručně popisuje návrhy na ukládání odpadů, které za současného stavu poznání a techniky nejsou zatím realizovatelné, ale možná

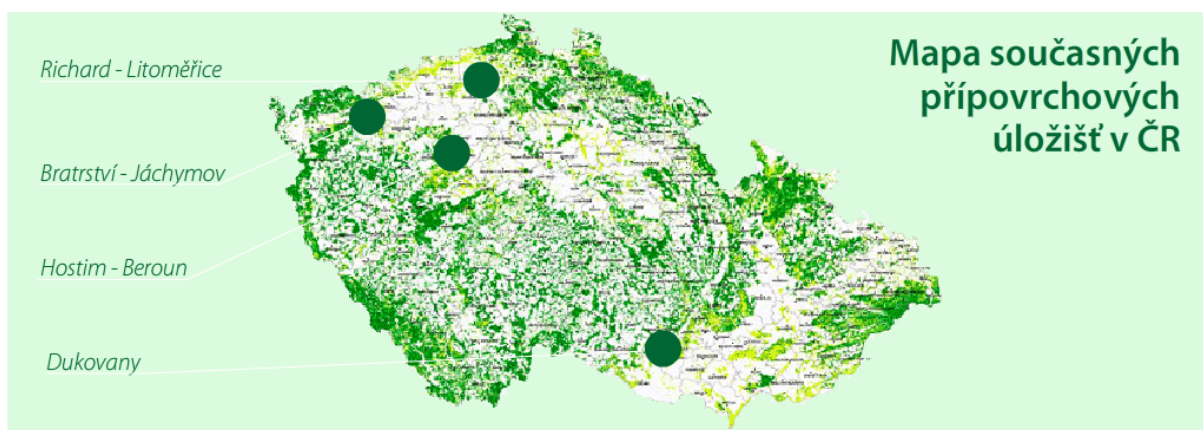
v budoucnu některý z těchto způsobů může být řešením pro ukládání a likvidaci vysoce radioaktivních odpadů. A některé postupy, které se využívají jen v zahraničí. Práce vyjmenovává a analyzuje základní geotechnické problémy, které se vyskytnou jak při výstavbě, tak i při provozu podzemního úložiště, a které musí být uspokojivě předem řešeny.

Hlavním přínosem práce je prezentace koncepcí nakládání s vysoce radioaktivními odpady a uvedení základních faktů k problematice. Srovnání všech současně využitelných a reálných možností. Seznámení se stavbou hlubinného úložiště radioaktivních odpadů a hlavně systémem bezpečnostních bariér, které se zde použijí.

2. Přehled stavu ukládání nebezpečných odpadů v podzemních úložištích v ČR a v zahraničí

2.1. Ukládání nebezpečných odpadů v České Republice

Tyto odpady se ukládají do povrchového úložiště v areálu elektrárny Dukovany a podzemních úložišť Richard a Bratrství. Oba tyto komplexy jsou vybudovány v místech bývalých dolů. Úložiště Hostím blízko města Beroun bylo zaplněno a uzavřeno v roce 1997. Stále se zde monitoruje vliv na životní prostředí a to v pravidelných intervalech. Zbylé 3 úložiště na území České republiky jsou stále v provozu [14].



Obr. 1 – Mapa současných přípovrchových úložišť v ČR, [14]

Odpady, které se v těchto úložištích ukládají, jsou takové, jež vznikají jak v jaderné energetice tak i odpady institucionální. Tyto odpady vznikají ve zdravotnictví, průmyslu, zemědělství apod. Zároveň jsou to odpady, které se řadí mezi nízko a středně aktivní odpady. Vysoce aktivní odpady, což jsou ve velké míře vyhořelé palivové články z jaderných elektráren, se prozatím ukládají v meziskladech vyhořelého jaderného paliva [14].

Institucionální odpady se před uložením vkládají do 100 litrových sudů, které se vloží do sudu o objemu 200 litrů a 5 centimetrová vrstva, která mezi sudy vznikne, se vyplní betonem. Vnější sudy jsou opatřeny z obou stran antikoročním nátěrem. Ostatní odpady se musí před přijetím do úložiště zalisovat, nebo zalít do betonu. Ukládají se do 200 litrových sudů, které

Richard

zasucená ventilační šachta

ventilační šachta

RICHARD III.

betonový předěl

zasucená šachta

RICHARD II.

zasucená šachta

vstupní tunel

Legenda

- nezařízené prostory
- hominové prostředí
- stabilizované úložné prostory s RAO
- úložné prostory
- chodby
- zařízený průchod
- komory zaplněné suti z ostatních komor

0 25 50 100 Meters

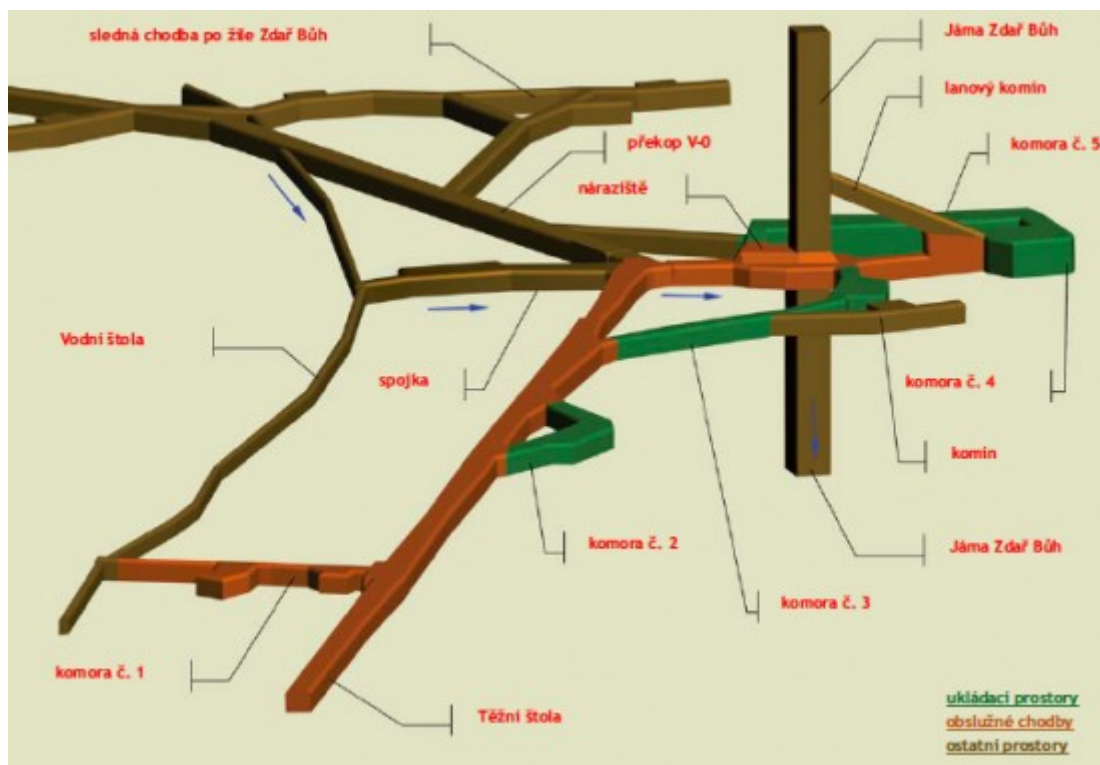
Vrstva vápence je cca 5m silná a nachází se 70 až 80 metrů pod povrchem. Nadloží i podloží je tvořeno slínovci o mocnosti přes 50 metrů. Obě tyto vrstvy představují účinné přírodní bariéry. Úložiště se nachází nad hladinou podzemní vody. Obslužné chodby úložiště jsou dlouhé 630 metrů. Šířka těchto chodeb se pohybuje kolem 6 až 8 metrů a výška mezi 3 až 4 metry. Okolo této chodby, jsou umístěny samotné ukládací komory (obr. 3). Úložiště Richard je v provozu od roku 1964 [14].



Obr. 3 – Sudy uložené v ukládací komoře před betonáží, [14]

Bratrství

Podzemní úložiště Bratrství je vybudované v místě bývalého uranového dolu Bratrství v Jáchymově. Komplex úložiště (obr. 4) zabírá jen malou část z opuštěného uranového dolu, které má celkovou rozlohu 9,8 kilometrů čtverečních a má přes 80 kilometrů štol a překopů [14].



Obr. 4 – Uspořádání ukládacích komor v úložišti Bratrství, [14]

Obslužnou komunikaci v úložišti tvoří upravená Těžní štola o délce 385 metrů, která ve své době sloužila na vyvážení materiálu ze slepé jámy Zdař Bůh a přilehlých dobývek. Ukládací komory, kterých je upraveno 5, se zaplňují tak, aby nebyl odepřen přístup k dalším štolám a jiným technologickým zařízením. Úložiště je v provozu od roku 1974 [14].



Obr. 5 – Uspořádání uložených sudů na sebe, [14]

Dukovany

Povrchové úložiště Dukovany se nachází přímo v areálu jaderné elektrárny Dukovany. Jaderná elektrárna Dukovany je první jadernou elektrárnou vybudovanou v České republice. Nachází se na území obce Rouchovany nedaleko města Třebíče [14].



Obr. 6 - Jaderná elektrárna Dukovany, [2]

Jedná se o největší a nejmodernější úložiště v České republice. Tvoří jej 112 železobetonových jímek, které jsou uspořádány do 4 řad po 28 jímkách. Každá jímka má rozměr $5,3 \times 5,4 \times 17,3$ m. Do každé jímky se vejde cca 1600 sudů s odpadem, každý sud má objem 200 l. Na horních hranách jímek je umístěna jeřábová dráha, kde pojíždí portálový jeřáb. Kabina tohoto jeřábu je z bezpečnostních důvodů stíněna proti účinkům radioaktivního záření. Portálový jeřáb zajišťuje manipulaci s naplněnými sudy. V případě naplnění jímky, dopraví na místo jeřáb betonový panel a jímka se jím uzavře. Poloha každého sudu je přesně zaznamenána a je tak možné monitorovat rozložení radioaktivních látek v úložišti. V provozu je toto úložiště od roku 1995 [14].



Obr. 7 – Ukládací jímka v areálu jaderné elektrárny Dukovany, [14]

2.2. Ukládání nebezpečných odpadů v zahraničí

Přípovrchová úložiště v zahraničí můžeme rozdělit dle umístění v území. A to tak jedná-li se o místo, které se vyznačuje častými atmosférickými srážkami cca nad 500mm/rok, nebo je to naopak suchá oblast. Tím se určí, zda je nutný vysoký počet inženýrských bariér. Dalším kritériem je konstrukce samotného úložiště. Ukládací jímky se mohou nacházet pod násypy nad zemským povrchem, nebo jsou zapuštěny v zemi. Zapuštěné úložiště se také budují převážně na území, kde se hladina podzemní vody nachází ve větších hloubkách [1].

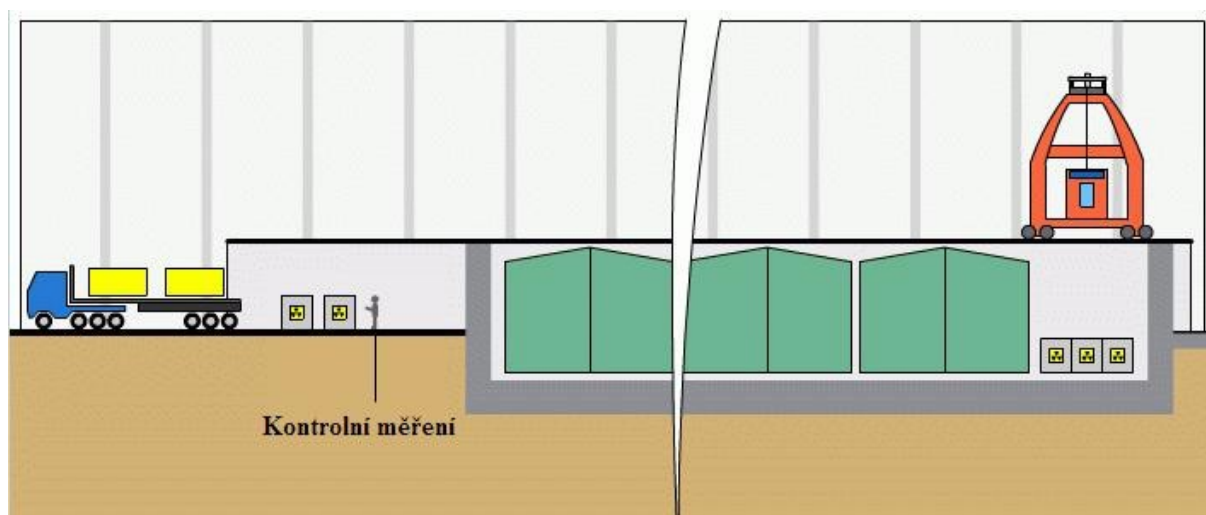
Přípovrchová úložiště s jímkami nad zemským povrchem ve vlhkých oblastech mají velkou potřebu inženýrských bariér a systémů k odvodu vody. Typickými zástupci těchto typů úložišť jsou například La Manche ve Francii, jež je vybudované formou násypů, pod kterými

se ukládací jímky nacházejí. Odpady se ukládají do sudů a jsou chráněny bitumenovou vrstvou. Všechna voda, která se dostane do tohoto násypu, je svedena do nádrží, kde se pravidelně kontroluje obsah radioaktivních látek, jež by se z odpadu mohly uvolňovat. Podobně je řešeno i úložiště Drigg ve Velké Británii, kde se odpady v primárních sudech ještě vkládají do klasických ISO kontejnerů a teprve potom uloží na místo [1].



Obr. 8 – Úložiště Drigg, [6]

V úložištích, která mají ukládací jímky vybudované pod zemí a nacházejí se ve vlhkých oblastech, je nutné, aby se hladina podzemní vody nacházela pod dnem těchto jímek. Pokud zde můžeme očekávat kolísání hladiny podzemní vody, což se ve vlhkých oblastech stává téměř stále, je nutné i tyto ukládací jímky opatřit potřebným počtem inženýrských bariér, aby bylo zabráněno proniku této vody k ukládanému materiálu. Typickým zástupcem je např. úložiště Rokkashu v Japonsku. Ukládací jímky jsou vybudované ze železobetonu, který chrání vrstva bentonitu. Porézní beton na vnitřních stěnách jímek by mohl ještě odvádět přebytečnou vlhkost do drenáže. Toto opatření by mělo naprosto zamezit proniku podzemních vod ke kontejnerům. Dalším příkladem je úložiště Mochovce na Slovensku. Jímky jsou taktéž budovány ze železobetonu, avšak odvod vody je zajištěn štěrkovou drenážní vrstvou, nacházející se pod dnem jímek. Ukládané odpady, které jsou ve 200 litrových sudech, se ještě uloží do kontejneru o objemu $3,1 \text{ m}^3$ a zalijí se kapalnými odpady. Podobně je také řešeno úložiště Püspökszilágy v Maďarsku [1].



Obr. 9 – Schéma uložení odpadu v úložišti Mochovce, [8]

Přípovrchová úložiště budovaná v suchých oblastech nepotřebují velkou ochranu pomocí inženýrských bariér, neboť jejich umístění je výhodné a účinné z hlediska kontaminace okolí. Jedná se především o vhodné složení okolní horniny a klimatické podmínky v dané oblasti. Příkladem může být úložiště Mt. Walton v Austrálii. Nachází se v poušti a je vzdáleno 30 km od nejbližší osídlené oblasti. Nachází se zde jediná inženýrská bariéra, kterou se po zaplnění ukládací jámky tato jámka překryje ve vrstvě 5 metrů silné. Jedná se o kaolinitický jíl. Odpady se do tohoto úložiště ukládají v pytlích a sudech. Podobně je na tom i úložiště Vaalputs v Jižní Africe, nebo Idaho National Laboratory v USA [1].

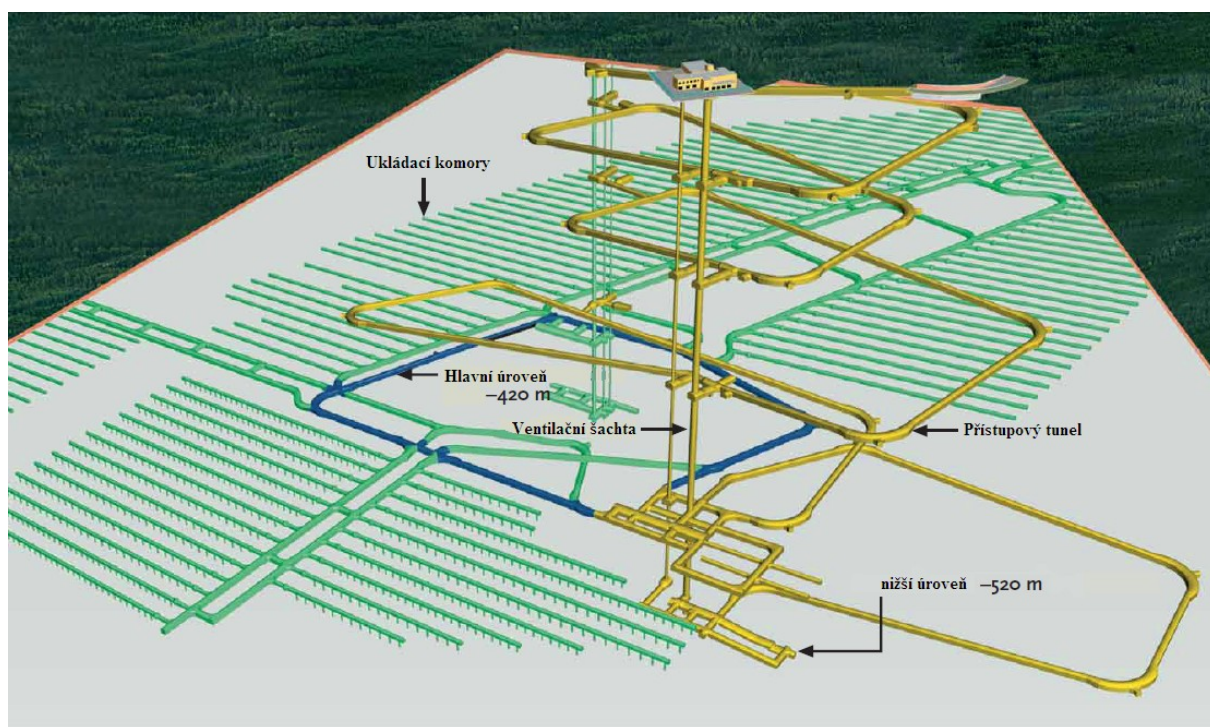


Obr. 10 - Idaho National Laboratory, [7]

Další příklad úložiště bez potřeby bariér se nachází v Nevadské zkušební lokalitě. V pouštní oblasti v místě úložiště se podzemní voda nachází v hloubce 488 metrů. Odpady se zde ukládají do kovových nebo dřevěných kontejnerů [1].

Dalším samostatným typem jsou úložiště ve středních hloubkách. Tyto díla se budují buď v místech uzavřených těžných dolech, které se upraví na prostory pro ukládání, nebo jsou tyto prostory cíleně budovány. Velká nevýhoda děl přetvořených na ukládací jámy je v budování původních prostor, kde mohly být využity metody, které by porušili okolní horninu. Tím by mohlo docházet snadněji k šíření radionuklidů. Jedná se o hloubky pětiset a více metrů pod povrchem, ale zároveň jde o úložiště jen nízko a středně aktivních odpadů. Toto úložiště se nachází například na území Německa. Příkladem může být úložiště Mosleben [1].

Příkladem úložiště účelně vybudovaného je např. Olkiluoto a Loviisa ve Finsku, kde se také nacházejí jaderné elektrárny. Do těchto úložišť se odpady ukládají v klasických 200 litrových sudech a plánovaná doba provozu je cca 40 let. Hloubky pro ukládání se zde pohybují kolem 60 až 100 metry. V areálu Olkiluoto je také v hloubce kolem 500 metrů vybudováno první trvalé úložiště pro vyhořelé jaderné palivo známé jako Onkalo [1], [14].



Obr. 11 - Úložiště Onkalo, [5]

Nebo úložiště Forsmark ve Švédsku, které je také účelově vybudováno a to při pobřeží pod mořským dnem. Hornina, jež odděluje ukládací prostory od mořské vody, má tloušťku 100 metrů. Do těchto prostor se sestupuje chodbou, která ústí na pobřeží. Po naplnění a uzavření

úložiště se předpokládá se zaplavením podzemní vodou, která se časem dostane až do moře. Než se tak stane, měla by aktivita uloženým materiálu klesnout na bezpečnou úroveň [1].



Obr. 12 – Úložiště Forsmark, [11]

V neposlední řadě jsou výhodné i úložiště vybudované v žulovém masivu. Příkladem může být třeba úložiště Himdalen v Norsku [1].

3. Koncepce s nakládáním vyhořelých palivových článků z jaderných elektráren

Palivové články před vložením do reaktoru a vyhořelé palivové články vypadají na první pohled stejně. Jediným, ale zato nezanedbatelným rozdílem je velmi vysoká radioaktivita těchto článků. Je nutné s nimi nakládat tak, aby nedošlo ke kontaminaci. V dnešní době se vysoce radioaktivní vyhořelé palivo z jaderných elektráren ukládá přímo v areálech elektráren. Posloupnost prací od vyjmutí až k uložení článků zabírá až několik desítek let, kdy klesá radioaktivita prvků na míru potřebnou k dalšímu zpracování nebo definitivnímu uložení. Výměna vyhořelého jaderného paliva probíhá kontinuálně, což znamená, že palivové články se nikdy z reaktoru nevyjmou všechny. A proto i reaktor může běžet nepřetržitě. Při výměně článků a jejich ukládání se užívá mokrého a suchého způsobu. Zatím nejrozšířenější je způsob mokrý, je ovšem spojen s vysokými náklady a proto i například v České republice je užíváno způsobu suchého [3], [9], [14].

Suchý způsob probíhá tak, že se palivový článek vyjme z reaktoru a přesune se do tzv. vymíracího bazénu, kde je uložen po několik let. Za přibližně 5 let klesne jeho aktivita na jednu desetinu původní hodnoty. Veškeré tyto přesouvací práce se provádějí pod vodou, kde před ozářením chrání cca 11 metrů vody. Po absolvování této doby v bazénech, které se nacházejí přímo vedle reaktoru v reaktorové hale, se použité články ukládají do speciálních kontejnerů, ve kterých se uloží do meziskladu použitého jaderného paliva. Ke skladování se mohou použít např. kontejnery CASTOR, jež se využívají i v České republice. Tento kontejner je 4 metry vysoký, s litinovým obalem, válcovitého tvaru. Práce, které již probíhají v těchto meziskladech, jsou bezpečné, neboť pracovníky před ozářením chrání 37cm tlustá stěna těchto kontejnerů. Do každého z těchto kontejnerů se vejde cca 10 tun použitého jaderného paliva. Za přibližně 50 až 60 let klesne aktivita prvků asi 200 krát [3], [9], [14].

V mokrému způsobu skladování se vyhořelé palivové články uchovávají v bazénech buď přímo u reaktoru, nebo mimo něj. Výhodou je, že voda zajišťuje spolehlivý odvod tepla a zároveň umožňuje vizuální kontrolu skladovaného materiálu. A skladovací kapacita se dá zvyšovat tím, že se články jednoduše ukládají do bazénu hustěji. Ovšem velká nevýhoda je spojená s náklady na zásoby vody a čištění, při němž zároveň vznikají další radioaktivní odpady v kapalném stavu.

Při návrhu koncepce je důležitá především bezpečnost. Je nutné dokázat, že uložený odpad je bezpečně oddělen od okolní biosféry. Je potřeba zabránit průniku podzemních vod ke kontejnerům a předejít tak migraci radionuklidů a kontaminaci okolní horniny. Některé z prvotních návrhů nepočítají s žádným uskladněním vyhořelých palivových článků, jedná se především o přepracování. Což je velkou výhodou vzhledem k životnímu prostředí. Při návrhu vhodného naložení s odpady se u některých technologií tyto fakta nepovedla dostatečně dokázat. Proto musely být některé z prvotních návrhů, ač byly v jiných ohledech zcela vhodné, zavrženy. V neposlední řadě je důležitým faktorem, na který je nutno přihlížet i finanční hledisko [3], [9], [14].

3.1. Ukládání do vod moří a oceánů

Odpady by se ukládaly do kontejnerů doutníkového tvaru a ty by se vháněly do usazenin na mořském dně do hloubky kolem 100 metrů. Popřípadě by se jednalo o vrty na mořském dně, kde by se kontejnery ukládaly. Z hlediska životního prostředí je tato metoda nepřijatelná, neboť dokazování o nemožnosti kontaminace vody a organismů by bylo velmi obtížné [1].

3.2. Ukládání do věčně zmrzlé půdy

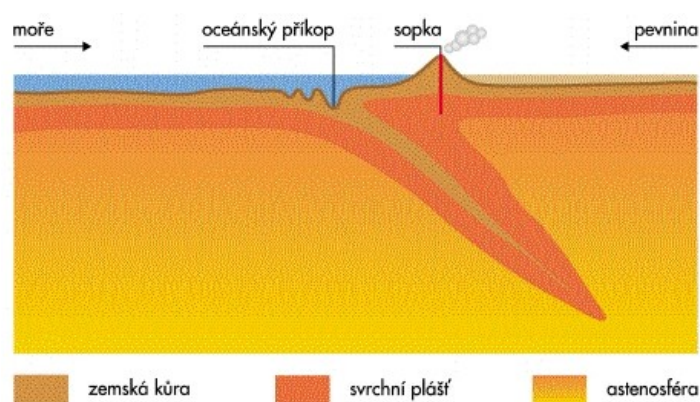
Z hlediska předpokladu globálního oteplování Země a vzhledem k tomu, že se jedná o uložení odpadů produkující teplo, je tato možnost nepřijatelná. Díky zvyšování teploty z venku i zevnitř, by mohlo dojít k průniku podzemních vod k těmto odpadům a jejich kontaminaci, která by se naprosto nekontrolovaně rozšířila do biosféry Země [1].

3.3. Hlubinné vrty

Hloubka těchto vrtnů by se podle původní myšlenky pohybovala okolo 10km. Z hlediska kontaminace biosféry by tato metoda pak ale byla jen zdánlivě účinná. Problém by nastal při průzkumných pracích, které by do takových hloubek byly téměř nemožné, ale hlavně nedůvěryhodné z hlediska bezpečnosti tohoto řešení [1].

3.4. Subdukční zóny

Princip spočívá v neustálé aktivitě zemských ker, které se v určitých místech zasouvají pod sebe (obr. 13). Tím by se docílilo samovolného zvyšování hloubky úložiště odpadů, neboť by se tyto radioaktivní odpady zasunuli do vrtu v zanořující se kře. Při hloubce vrtu 5 až 8 km, by se během několika desítek tisíc let dostaly zhruba na 50 km pod zemským povrchem. Problémy by se objevili v realizaci několika kilometrových vrtů. Pokud by se dále v těchto určitých lokalitách objevila sopečná aktivita, mohla by vyvést tyto nebezpečné odpady zpět na zemský povrch [1].



Obr. 13 – Subdukční zóna, [10]

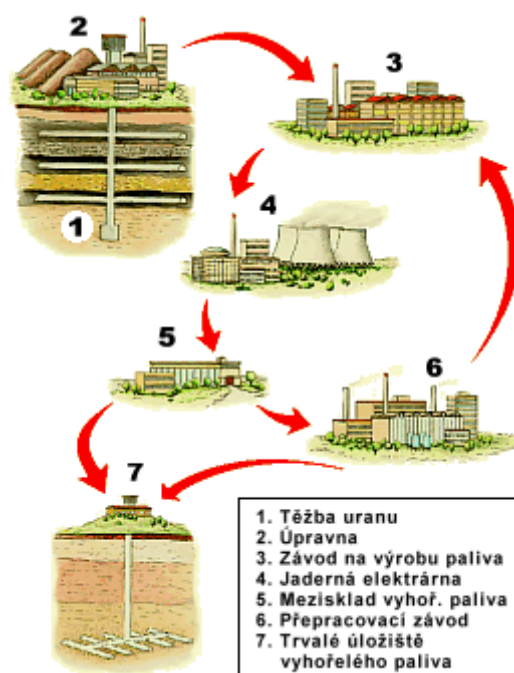
3.5. Mimoszemské ukládání

Největším problémem je finanční hledisko ve srovnání např. právě s hlubinnými úložišti, neboť tento postup zbavování se odpadů by byl možná až desetkrát dražší. Dalšími hledisky jsou například etický problém, nebo bezpečnost při vzletu rakety s nebezpečnými odpady [1].

3.6. Chemické přepracování

Tato metoda jako jedna z mála prvotních návrhů se ve světě užívá. Jedná se o metodu z ekonomického hlediska velmi náročnou, proto si ji mohou dovolit používat jen silné země s rozsáhlým jaderným programem. Metoda chemického přepracování ale příliš oblíbená není.

Je zde velké riziko nebezpečí jak pro pracovníky, tak pro okolí. Vyhořelé palivové články, které vykazují velkou míru radioaktivity, je nutné jako první vyjmout z ochranného zirkoniového obalu a rozpustit v kyselině dusičné. Z roztoku, který vznikne, se chemicky oddělují jednotlivé prvky, především plutonium a uran. Oddělené plutonium se znovu použije a z uranu se vyrábí palivo nové. Zbytky ochranných obalů se musejí uložit jako středně aktivní odpad. Což je při chemickém přepracování jen další nevýhodou, že zde vznikají další odpady, které je nutné uložit [1], [13].



Obr. 14 – Schéma přepracování radioaktivních odpadů, [4]

3.7. Reaktory IV. Generace

Jedná se o reaktory, jejichž návrhy vycházejí z předchozí generace jaderných reaktorů, reaktorů III. generace. Rozdíly jsou především v principech fungování reaktorů, neboť návrhy, se kterými se pracuje u IV. generace, jsou úplně nové a zatím se v jaderné energetice nevyužívají [12].

Hlavní přínos, který budou reaktory IV. generace představovat, je v podobě využití zatím pouze potencionálních paliv, jako je například Thorium 232, nebo navracení vysoce aktivních

isotopů zpět do aktivní zóny reaktoru. Jaderný odpad by nevykazoval tak vysokou aktivitu, jako vykazuje odpad dnes. Mohl by být uložen jako středně či nízko aktivní. Nevznikaly by odpady tolik nebezpečné pro životní prostředí a otázka koncepce nakládání s vysoce aktivními odpady by byla minulostí [12].

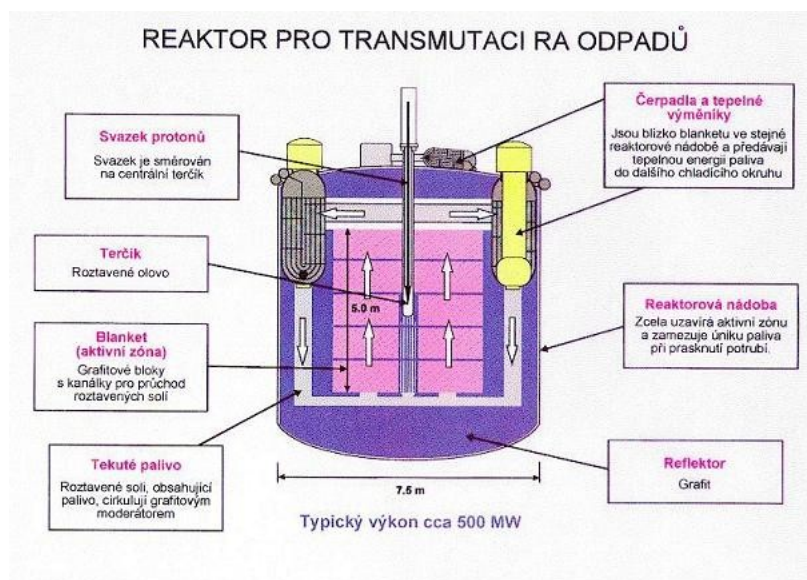
V minulosti již vzniklo Mezinárodní fórum pro generaci IV. Jedná se o organizaci, která se zabývá koncepcí reaktorů IV. generace. Všechny členské státy využívají ve velké míře jadernou energetiku a tak je otázka ukládání těchto odpadů pro ně velmi důležitá. Podílejí se na vývoji a výzkumu koncepce. Státem, který se odmítl zapojit je kupříkladu Indie. Je známo, že na území státu jsou velké zásoby Thoria 232 a tak Indie pracuje na vlastní koncepci reaktorů speciálně se zaměřením na využití tohoto prvku [12].

Při návrhu koncepce se klade také velký důraz na bezpečnost. Projekt počítá i s ochranou samotného reaktoru proti útokům zvenčí, jako je raketový útok, pád letadla, nebo pokusy o únik štěpných materiálů pro výrobu jaderných zbraní. Ekonomické hledisko je samozřejmostí. Provoz reaktoru musí být konkurenceschopný. Reaktory se také navrhují na delší dobu životnosti, než je tomu u současných reaktorů, výměna palivových článků bude probíhat po delší době a měli by být navrženy tak, aby byla výroba elektrické energie efektivnější a počítá se zapojením do jiných oblastí, jako je například využití tepelné energie, nebo výroba vodíku [12].

Do skupiny reaktorů IV. generace patří šest druhů speciálních reaktorů. A to reaktor založený na roztavených solích (solný reaktor) označovaný MSR, sodíkem chlazený rychlý reaktor neboli SFR, olovem chlazený rychlý reaktor LFR, plynem chlazený rychlý reaktor GFR, reaktor SCWR chlazený superkritickou vodou, což je voda na pomezí kapalného a plynného skupenství, a vysokoteplotní reaktor VHTR. Plánované započatí využití této koncepce je již v tomto století v rozmezí dvacátých až třicátých let [12].

3.8. Technologie ADTT (urychlovačem poháněná transmutační technologie)

Tato technologie byla navržena již v padesátých letech 20. století. Spočívá ve výstavbě nového druhu reaktoru v kombinaci s výkonným urychlovačem. V tomto reaktoru by se přepracovaly již vyhořelé palivové články, ale také třeba přírodní thorium, neboť zásoby toho prvku jsou přibližně asi třikrát vyšší než zásoby uranu v zemské kůře. Obě tato jaderná paliva nejsou samy o sobě schopny udržet řetězovou reakci a nemohou být proto použity. Vzhledem k ekonomické náročnosti chemického přepracování by ale těžba nového uranu byla levnější alternativou. Základním principem technologie ADTT je urychlovač protonů, umístěný v reaktoru a sloužící jako vedlejší zdroj štěpení, o které se postarají neutrony vystřelené z protonů tříštivou reakcí z terčíku uvnitř aktivní zóny reaktoru (obr. 15). Bezpečnostní předností reaktoru je právě podkritický režim reaktoru, který musí být popoháněn urychlovačem protonů. Nemůže dojít proto k nekontrolovatelné řetězové štěpné reakci, neboť rychlost takovéto reakce je řízena urychlovačem protonů, který by se dal vypnout, a tím by se reakce přerušila [13].



Obr. 15 – Schéma reaktoru pro technologii ADTT, [13]

Vysoká radioaktivita je zajištěna dlouho žijícími isotopy, které by se přímo v reaktoru mohly od krátkodobých a stabilních isotopů oddělovat a navracely by se zpět do aktivní zóny. Krátkodobé a stabilní isotopy by se mohly ukládat na běžná úložiště, kde by jejich aktivita klesla na úroveň přírodního radioaktivního pozadí již za několik desítek let. Vývoj této

teologie provází velmi obtížné technické řešení zejména urychlovače protonů. Tato metoda by však mohla znamenat pro budoucí generace omezení, nebo úplnému zastavení těžby uranu [13].

3.9. Věčné uložení do horninového prostředí

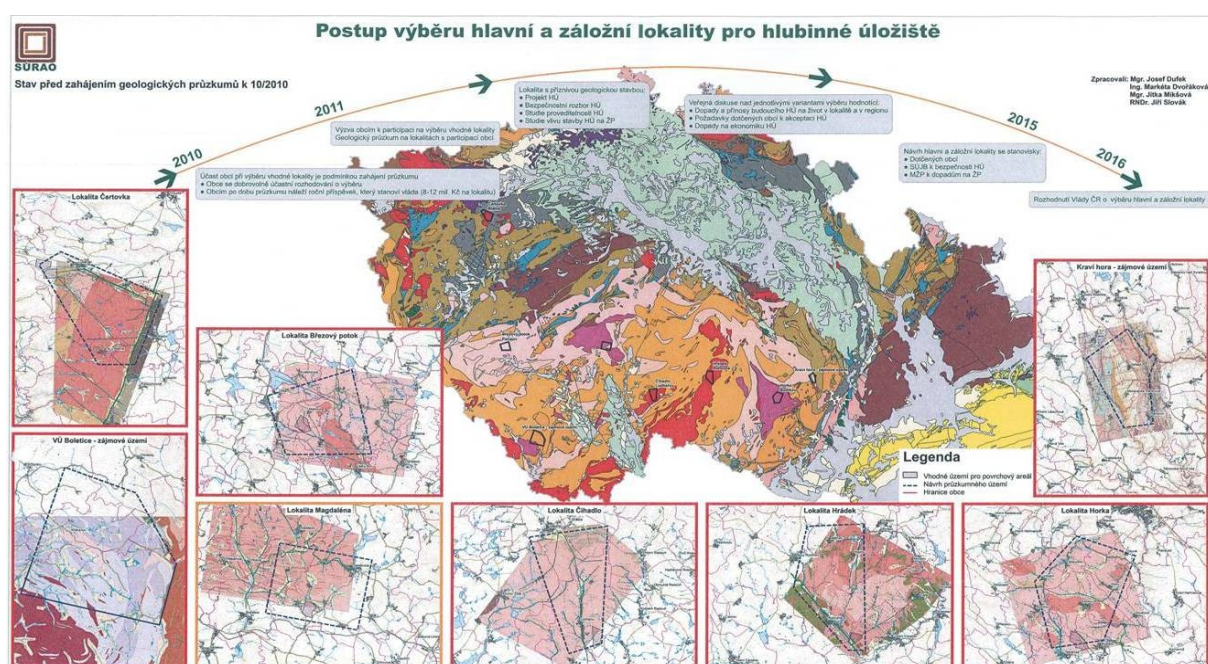
Výběr vhodné koncepce a strategie nakládání s radioaktivními odpady a vyhořelým jaderným palivem závisí na různých faktorech. Proto se zvolené postupy v jednotlivých zemích liší. Bavíme-li se o možnosti hlubinného uložení, jsou nejdůležitějším faktorem vlastnosti horninového prostředí. Dále to ale také může být otázka dostupnosti různých technologických postupů, dostupnost dostatečných finančních prostředků, ale také faktory sociálně politické a veřejné mínění. Neboť pro mnoho obyvatel je představa hlubinného úložiště v jejich kraji naprosto nepřijatelná.

V současné době je ale myšlenka ukládání těchto nebezpečných odpadů do hlubinných úložišť nejpříjemnější. Nejedná se o názor pouze České republiky, ukládání do těchto geologických formací, je cílem naprosté většiny všech zemí, jež jaderné elektrárny využívají. Takovéto geologické formace ve velkých hloubkách se již ve světě používají k ukládání odpadů. Jedná se ale o odpady nízké a středně aktivní. Tyto úložiště jsou jakousi předlohou pro určení vhodných technologií budování a samotná konstrukce hlubinného úložiště pro vysoce aktivní odpady se téměř neliší.

Hlubinným úložištěm radioaktivních odpadů se rozumí místo, kde by byly vyhořelé palivové články z jaderných elektráren, ale také některé vysoce radioaktivní odpady, natrvalo uloženy. Vysoce radioaktivní odpady vznikají např. v lékařství, výzkumu, průmyslu, ale také z jaderné energetiky. Horninové prostředí, do kterého by se mělo v budoucnu ukládat, se liší dle geologických podmínek daných lokalit všech států, které se pro tuto alternativu rozhodnou. Například Švédsko nebo Česká republika se přiklání k vybudování úložiště v žulovém masivu, Německo si předběžně vybralo jako vhodnou lokalitu solný důl, v Nizozemsku se jako vhodná lokalita považuje solné nebo jílové prostředí. Jílové formace se zdají být ideální i například v Belgii. Také Finsko se rozhodlo pro tuto variantu a buduje úložiště Onkalo, viz kapitola 2.2. [4], [14].

4. Technické řešení úložiště vyhořelých palivových článků z jaderných elektráren

Výstavba hlubinného úložiště radioaktivních odpadů je pro Českou Republiku zatím ve fázi výběru vhodné lokality. Je zatím vytipováno osm vhodných lokalit a zájmových území (obr. 16) pro jeho výstavbu. Ve všech těchto lokalitách na základě souhlasu dotčených obcí probíhají průzkumy určující vlastnosti horninového prostředí a jeho vhodnost pro výstavbu úložiště [14].

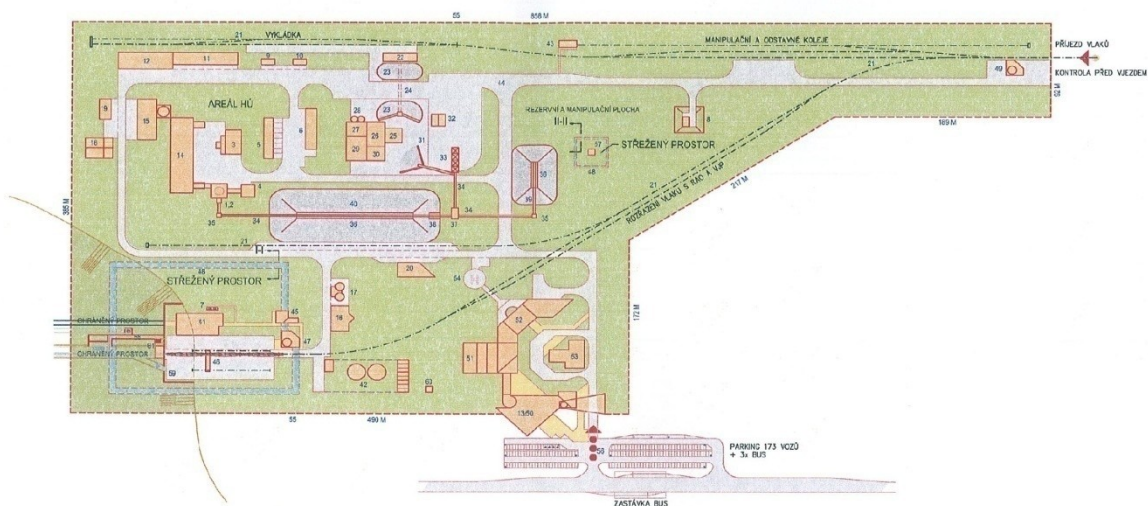


Obr. 16 – Postup výběru hlavní a záložní lokality pro hlubinné úložiště, [14]

Tyto průzkumy se skládají v první řadě z měření na povrchu. Poté se budou provádět vrty do hloubky kolem 5 metrů, kde se odeberou první vzorky horniny. Postupuje se dalšími vrty do hloubky až 500 metrů a nakonec jeden nebo dva vrty o šířce jen několik centimetrů do hloubky až 1 km pod zemí. Na základě tohoto průzkumu se rozhoduje z největší části o vhodnosti konkrétní lokality. V neposlední řadě je důležité také technické řešení nadzemního areálu, a zda bude možné jej v tomto místě realizovat. Úložiště také musí být na takovém místě, kde bude dobře přístupné z hlediska dopravy. Posuzovat se bude vliv na životní prostředí v konkrétních lokalitách a ekonomické hledisko. Ovšem nejdůležitější je souhlas

s vybudováním hlubinného úložiště radioaktivních odpadů od všech dotčených obcí. Neboť každá obec má právo toto úložiště odmítnout [14].

Konstrukce hlubinného úložiště se bude skládat z nadzemního areálu a podzemních prostor. Studie nadzemního areálu (obr. 17) počítá s umístěním prostor, které budou sloužit jak k manipulaci s vytěženou horninou, jež budou zabírat největší plochu, tak i prostory, kde se bude odpad ukládat do speciálních kontejnerů, ve kterých se dopraví do ukládací komory. Dále se zde budou nacházet prostory pro zaměstnance. Jedná se o šatny a sociální zařízení, nebo místnosti pro pobyt pracovníků. Součástí nadzemního areálu budou také administrativní budovy a objekty technického zázemí, nebo plochy kolejové dopravy a jiné komunikace. Budova informačního centra bude zde zřízena především pro veřejnost. Obklopen systémem fyzické ochrany bude jak celý areál, tak i vyústění podzemních komunikací na povrch [14].

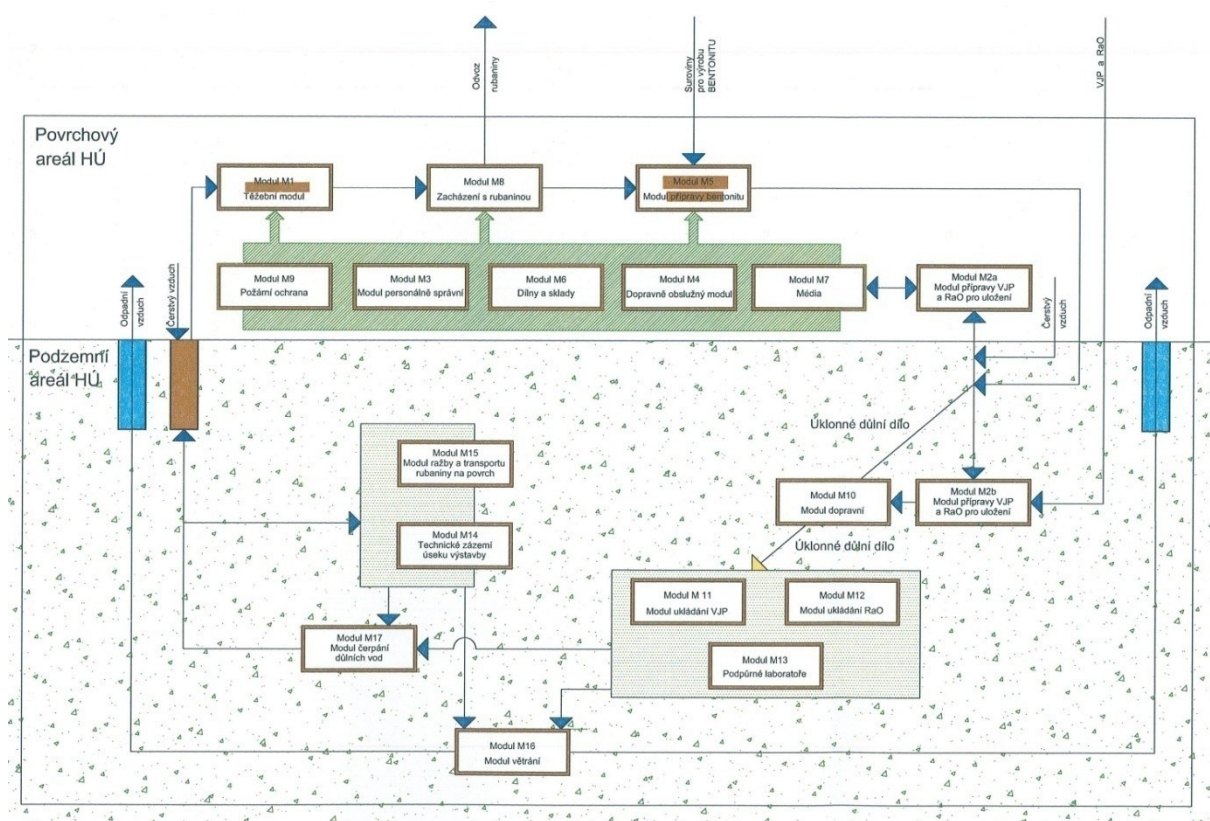


Obr. 17 – Návrh půdorysného uspořádání nadzemního areálu, [14]

V podzemních prostorech se budou především nacházet svislé šachty, těžební jáma a výdušná jáma a tunel ve tvaru šroubovice. Ten by měl sloužit k přepravě ukládacích kontejnerů do podzemí nebo přístupu pracovníků. Tímto systémem se docílí oddělení provozů a to těžby a samotného ukládání. Díky oddělení obou provozů bude možno začít první odpady ukládat v průběhu výstavby úložiště. Postupovat by se mělo tak, že se vyhloubí obě jámy a vybuduje přístupový tunel. Díky tomu se bude moct započít budování sekce I (obr. 19) ukládacích komor v hloubce kolem 500 metrů. Délka těchto komor by mohla být až 300 metrů. Zda budou kolmé ke stěnám chodeb, nebo se bude ukládat do svislých vrtů, se rozhodne, dle konkrétních vlastností horninového masívu vybrané lokality. Postup a způsob ukládání se určí

až při započatí provozu, dle technologií, které budou v té době dostupné. Po dokončení sekce I se začnou přivážet první sudy s odpadem a provoz bude zahájen. Zároveň s tím se bude pokračovat budováním dalších sekcí pro ukládání. Součástí podzemních prostor by měly být laboratoře a technické zázemí. Všechny podzemní ukládací komory budou vybudovány v jedné úrovni v hloubce, kde je zkoumaný masív nejstabilnější [14].

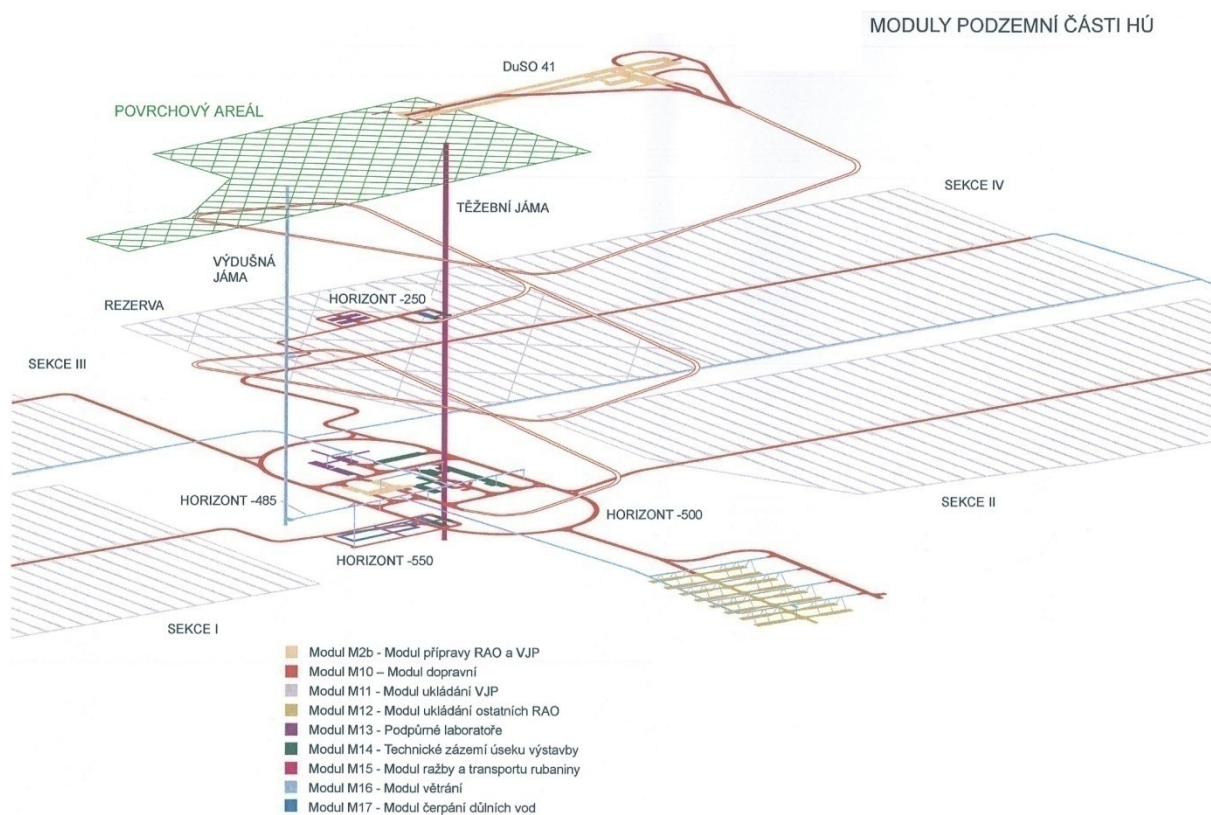
Schéma vazeb mezi jednotlivými moduly (obr. 18) jednoznačně ukazuje, jak budou provozy výstavby a ukládání od sebe odděleny stejně tak cesta odkluzu rubaniny a dopravní cesta pro ukládaný odpad.



Obr. 18 – Vazby mezi funkčními moduly hlubinného úložiště, [14]

Při realizaci se musí počítat také s odčerpáváním vod. Jsou to vody důlní, které vnikají do díla během ražby z povrchu, nebo se jedná o prosakující podzemní vody. Při výstavbě mohou být také použity mechanismy, k jejichž principu patří chlazení vodou, která potom gravitací stéká do níže položených míst raženým dílem. V projektu je tato skutečnost ošetřena modulem čerpání důlních vod, který se nachází na nejnižší položeném místě a v horizontu laboratoří na

úrovni -250 (obr. 19). Obě tyto jednotky vedou potrubím odčerpanou vodu těžební jámou k povrchu, kde se by se měla nacházet sběrná jímka.

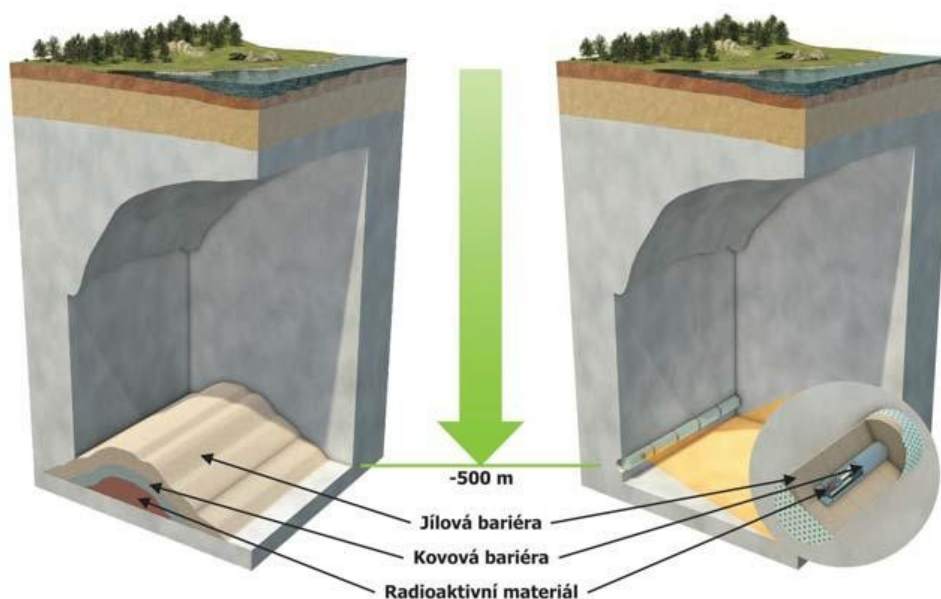


Obr. 19 – Návrh uspořádání podzemních modulů, [14]

V neposlední řadě je při výstavbě podzemních děl kladen velký důraz na větrání prostor během výstavby ale i po dokončení při užívání díla. Během realizace projektu se musí do prostor vhánět čerstvý vzduch k dýchání a v prostorách zajistit vyhovující pracovní podmínky včetně ideální teploty s čímž souvisí geotermický stupeň, jehož průměrná hodnota se na území Evropy pohybuje okolo 33m/K [15]. To znamená, že v podzemním pracovišti se zvýší teplota o 1 stupeň na každých 33 metrů hloubky. Dále se musejí větrat všechny škodlivé technické plyny a případně při využití trhacích prací povýbuchové zplodiny. Při dokončení výstavby a uvedení úložiště do provozu je také důležité všechny prostory větrat. Vzhledem k předpokládanému pohybu pracovníků je nutné i zde připravit vyhovující pracovní podmínky z hlediska dýchání i ideální teplotní podmínky. Dále je zde možnost vzniku požáru v podzemních prostorách, kdy by měl být zajištěn odvod kouře a účinků tepla z požáru. Větrání realizační fáze i sekcí uvedených do provozu bude zajištěno systémem potrubí, jež bude ústít do výdušné jámy (obr. 19).

5. Řešení geotechnických problémů s ohledem na potřeby úložišť vysoce radioaktivních odpadů

Projekt hlubinného úložiště radioaktivních odpadů musí brát velkou zřetel především na bezpečnost. Je nutné dopředu navrhnout takové řešení, které by předcházelo kontaminaci okolí a ohrožení životního prostředí. Proto se při přípravě projektu provádějí matematické modely na navrhované řešení, díky kterým se dokazuje účinnost bezpečnostních bariér. Které jsou neodmyslitelnou součástí celého projektu. Tyto modely se s každým nově získaným poznatkem zpřesňují a vylepšují [14]. Počítá se s několika základními faktory, které by mohly mít za následek katastrofu v podobě úniku velkého množství radionuklidů. To může nastat buď okolní horninou, nebo v podzemních vodách, které by mohly ke skladovanému odpadu proniknout. Dalším hlediskem je doba, po kterou bude materiál skladován, než jeho radioaktivita klesne na bezpečnou úroveň. Jedná se až o statisíce let, kdy je nutné vybrat vhodný materiál skladovaných kontejnerů, který po celou dobu rozpadu radionuklidů vydrží. Díky výběru vhodné lokality a výstavbě několika bariér, bude toto opatření možno dodržet. K nejdůležitějším problémům, které s výstavbou hlubinného úložiště souvisejí, patří stabilita masivu, hydrogeologie a tepelná energie skladovaného materiálu.

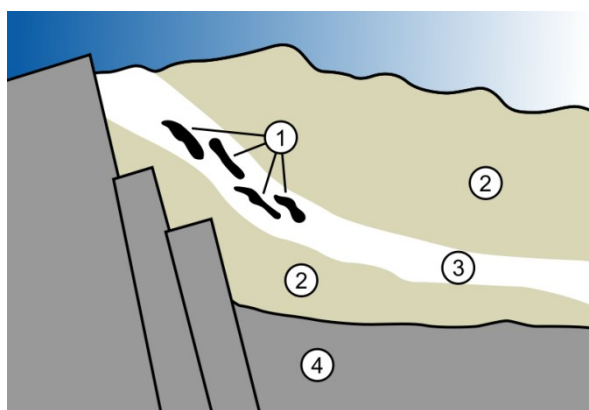


Obr. 19 – Přírodní analog, [14]

5.1. Stabilita masivu

Je důležité, aby vybraný horninový masiv, neprokazoval poškození a tím i cestu pro šíření radiace. Kromě přirozeného procesu, kdy by mohlo k porušení dojít, je důležité myslet na lidský faktor. Je důležité, aby při hloubení jam a postupu čelby v chodbách byly použity takové mechanismy, které by nenarušily integritu horninového masivu. Nevhodné by tedy mohlo být využití trhacích prací, kdy by díky otřesům a šíření seizmických vln mohlo k takovému porušení dojít. Ovšem výběr takovéto vhodné mechanizace bude probíhat až v době započatí výstavby, je možné, že dostupná technologie v této době bude jiná a hlavně vhodnější, než technologie využitelné dnes.

Horninový masiv, do kterého by mělo být úložiště umístěno, bude žulový. K rozhodnutí přispěly některé zajímavé úkazy viditelné všude po světě, ale i na území České Republiky. Jedná se o naprosto přírodní jevy, jež vznikly před miliardami let. Proto je granitová hornina považována za jednu z nejdůležitějších bezpečnostních bariér a je nejstabilnějším prvkem celého bezpečnostního systému. Je to především z toho důvodu, že radionuklidy se granitovou horninou šíří velmi pomalu. Jak bylo vypořádováno např. v Africe, kde se nachází přírodní reaktor Oklo (obr.19). Řetězová reakce štěpení, která zde probíhala, je téměř stejná, jaká se využívá v dnešních reaktorech. Radionuklidy, se zde pohybují rychlostí 10 m/ 1 mil let [14].



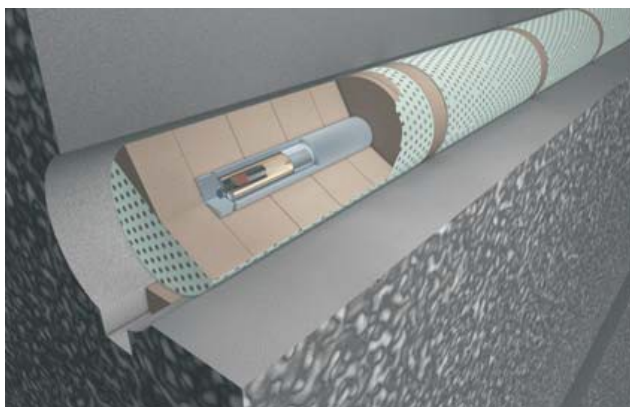
Obr. 20 - Schéma reaktoru Oklo, [15]

Popis: 1 – nukleární reaktor, 2 – pískovec, 3 – ruda, 4 – žula,

Podobný jev na území České Republiky je Ruprechtov. Uranová ruda, která je zde umístěna v jílech, je na povrchu v podstatě nezaznamenanatelná. Další úkazy jsou v podstatě velmi

podobné a složení okolního masívu, taktéž odpovídá. Na všech těchto místech neproniká žádné měřitelné záření k povrchu [14].

Horninový masív složený z granitu (obr. 20) bude skladovaný materiál chránit i před vnějšími vlivy. Blízká seizmická aktivita, která by se ve vybrané lokalitě mohla nacházet, by měla být vyloučena, díky provedeným podrobným geologickým průzkumům. Pevnost a stabilita masívu, musí ochránit skladované kontejnery před porušením, taky z hlediska vnějších vlivů. Mohlo by dojít k teroristickým útokům, nebo případnému pádu letadla, výbuchům na povrchu apod. Masív musí v této situaci předejít katastrofě. Pokud se vyloučí pomocí průzkumu jakékoliv porušení, či geologické zlomy, bude granit schopen ochrany úložných kontejnerů před všemi těmito vnějšími vlivy [14].



Obr. 21 – Vodorovně umístěná ukládací komora v granitové hornině, [14]

5.2. Hydrogeologie s ohledem na šíření radionuklidů

I v této problematice je stabilita masívu velmi důležitá. Především z důvodu možnosti prostupu podzemních vod až ke skladovanému odpadu. Hrozí zde možnost kontaminace této vody a nekontrolované šíření do okolní biosféry. Tento problém šíření radionuklidů bude mít ještě pojistnou bariéru, kterou bude bentonitový obal (obr. 21). Bentonit neboli jíl, by se měl nacházet v ukládací komoře, do které se vloží kontejner a poté se tímto materiálem zcela naplní. Veškerý prostor mezi kontejnerem a granitem bude vyplněn jílem. Kdyby nastala situace, že by k ukládací komoře pronikla voda, bentonit, díky bobtnavým vlastnostem ve

styku s vodou, utěsní ukládací komoru a tím by se zamezilo dalšímu prostupu vod ke skladovaným odpadům [14].



Obr. 22 – Bentonitový obal v ukládací komoře, [14]

5.3. Výměna tepla mezi skladovaným odpadem a okolní horninou

Důležitým aspektem kromě vysoké radioaktivity je teplota, kterou vykazují vyhořelé palivové články vyjmuté z reaktoru. Jak bylo výše popsáno, první přesouvání a skladování se provádí pod vodou, která kromě ochrany před ozářením, také zajišťuje stálé chlazení. I u suchého způsobu skladování dochází k odvodu tepla, které zajišťují samotné kontejnery CASTOR do okolního vzduchu. Tepelná energie při skladování klesá a její hodnota po 50 letech, kdy je kontejner uložen v meziskladu, je tak malá, že tuto energii odstíní kontejnery (obr. 22), které budou vyhotoveny z antikorozních materiálů a chemicky stabilních tak, že pro okolní horninu nepředstavuje problém. K odvodu tepla také přispěje bentonitový obal [14].



Obr. 23 – Vyhořelé palivové články v ukládacím kontejneru, [14]

Materiál ke zhotovení těchto kontejnerů se bude postupem času vylepšovat tak, aby vydržel být stabilní po celou dobu nutné izolace odpadů od životního prostředí. Tato doba může dosahovat až statisíců let. K vývoji vhodného složení kovu pro výrobu ukládacího kontejneru takéž, jako u masívu, slouží i přírodní úkazy, kdy byly z moře vyloveny zbytky měděných předmětů. Tyto předměty zde ležely déle než 2,5 tisíce let. Byly prakticky neporušené korozi. Je to důkaz o tom, že vhodným složením je možné dosáhnout dlouhé životnosti kontejnerů v místech uložení bez přítomnosti volného kyslíku [14].

6. Závěr

Při ukládání vysoce aktivních odpadů se jedná o globální problém, který musejí řešit všechny státy využívající jadernou energetiku. Proto se předpokládá také mezinárodní spolupráce při budování hlubinných úložišť. Vyspělejší státy, které s výstavbou mohou začít dříve, by měli poskytovat ostatním poznatky, na něž přišli během stavby, nebo po dokončení.

Samotná výstavba by měla probíhat, jak již bylo zmíněno v etapách, kdy se vybuduje první ukládací sekce a s výstavbou druhé započne provoz úložiště. Tímto se docílí urychlení uložení prvních sudů. Je proto důležité, aby přístupové cesty k rozestavěné sekci a do ukládacích komor byly oddělené. Vzhledem ke skutečnostem, že započatí výstavby se plánuje velmi dlouho dopředu, nelze s předstihem přesně určit, které mechanismy a postupy výstavby budou nejúčinnější a nejvhodnější z co nejvíce hledisek. Další možností, která by mohla nastat, je objev zcela nového systému zbavování se vysoce aktivních odpadů. Pokud by se zdokonalila metoda chemického přepracování, nebo by se do chodu uvedly speciální reaktory s využitím technologie ADTT, nebo reaktory IV. generace a byla by tato metoda, nebo jí podobná, ekonomicky dostupná pro všechny země, byla by upřednostňována před výstavbou složitých komplexů hluboko v podzemí, které jsou navíc pořád převážnou většinou veřejnosti odmítané. Je tedy také možnost, že by se hlubinné úložiště začalo budovat, ovšem v průběhu výstavby by se projekt zastavil a přešlo by se na metodu výhodnější. Mohlo by dojít ke zprovoznění a uzavření například jen jedné sekce a zbytek projektu by se nikdy neuskutečnil. Je to další výhoda spojená s tímto způsobem budování projektu. Kdyby se postupovalo tak, že se první postaví celé úložiště a teprve potom se uvede do provozu, mohlo by dojít k tomu, že ani jedna jeho část by nebyla využita z důvodu přechodu na jinou metodu. Nestihlo by se celé dokončit a tak by k jeho zprovoznění vůbec nedošlo.

Seznam použitých pramenů

Literatura

- [1] DLOUHÝ, Zdeněk, *Nakládání s radioaktivním odpadem a vyhořelým jaderným palivem*, Brno: VUTIUM, 2009. ISBN 978-80-214-3629-9

Internet

- [2] <http://www.atominfo.cz>
[3] <http://www.cez.cz>
[4] <http://www.energyweb.cz>
[5] <http://www.everwas.com>
[6] <http://www.iema.net>
[7] <http://www.inl.gov>
[8] <http://www.javys.sk>
[9] <http://www.je-temelin-dukovany.cz>
[10] <http://www.leccos.com>
[11] <http://www.nuclearcounterfeit.com>
[12] <http://www.osel.cz>
[13] <http://www.protoatom.cz>
[14] <http://www.surao.cz>
[15] <http://www.wikipedia.org>